第 40 卷 第 3 期
2023 年 6 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 40 No. 3
Jun. 2023

文章编号: 1000-4939(2023)03-0504-18





张永杰，西北工业大学教授、博士生导师，主要从事飞行器设计研究工作。担任“飞行器布局设计研究所”副所长，航天三院磁浮电磁推进总体部“结构副总师”，中国飞机强度研究所客座研究员，《应用力学学报》青年编委，国际无人机标准委员会 WG5 工作组专家。入选重庆市、安徽省、黑龙江省、山西省、江西省、江苏省科技专家库专家。山西省通用航空产业联盟专家委员会委员。主持国家自然科学基金 2 项、国家级项目(含子课题)20 余项。参与制定多项国家和国际标准。获得省部级一等奖 3 项、三等奖 1 项，中国航空学会科技二等奖 1 项，中航工业科技成果二等奖 1 项、三等奖 1 项，陕西省教学成果特等奖 1 项。

飞机翼面结冰试验积冰厚度探测技术研究进展

张永杰，张露，罗贵森

(西北工业大学民航学院，710072 西安)

摘 要: 结冰导致的飞机翼面升阻特性恶化直接威胁飞行安全，一直以来都是航空领域关注的热点问题，为了复现翼面结冰过程和剖析翼面结冰、防除冰机理，开展翼面结冰试验十分必要。为了定量刻画飞机结冰试验中的翼面积冰厚度和形态，国内外研究人员开展了大量卓有成效的测试方法研究。本研究通过系统梳理近年来提出的翼面积冰厚度和冰形测量方法以及结冰传感装置，按照物理原理将其划分为直观法、谐振法、光学法、电学法、热学法、波导法、混合法等测量方法，简要介绍了各方法的设计原理、优缺点和适用范围，期望能够为飞机翼面结冰试验、防除冰系统设计等技术发展提供有益参考。

关键词: 结冰厚度; 结冰传感器; 厚度测量; 结冰试验; 技术综述

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11776/j.issn.1000-4939.2023.03.002

Advances in reserach on ice accumulation thickness detection technology in aerofoil icing test

ZHANG Yongjie, ZHANG Lu, LUO Guisen

(School of Civil Aviation, Northwestern Polytechnical University, 710072 Xi'an, China)

Abstract: The deterioration of lift-drag ratio of aerofoil surface caused by icing is a direct threat to flight

收稿日期: 2022-11-14 修回日期: 2022-12-05
基金项目: 国家自然基金资助项目(No. 11972301); 国家级民机资助项目(No. D5130190022; D5130200122)
通信作者: 张露。E-mail: zhanglu0059@163.com
引用格式: 张永杰，张露，罗贵森. 飞机翼面结冰试验积冰厚度探测技术研究进展[J]. 应用力学学报，2023，40(2): 504-521.
ZHANG Yongjie, ZHANG Lu, LUO Guisen. Advances in reserach on ice accumulation thickness detection technology in aerofoil icing test[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(2): 504-521.

safety and has always been a hot issue in the aviation field. In order to reproduce the icing process of the aerofoil surface and analyze the mechanism of aerofoil surface icing/anti-icing, it is necessary to carry out aerofoil surface icing test. In order to quantitatively characterize the thickness and shape of ice in aircraft icing tests, domestic and foreign researchers have carried out a large number of effective test methods. This paper systematically summarizes the measurement methods of aerofoil area ice thickness and ice shape and icing sensing devices proposed in recent years, and divides them into visual method, resonance method, optical method, electrical method, thermal method, waveguide method, hybrid method, and other measurement methods according to the physical principle. The working principle, advantages and disadvantages, and application scope of each method are briefly introduced. It is expected to provide useful reference for the technical development of aerofoil surface icing test and anti-icing system design.

Key words: ice thickness; ice sensor; thickness measurement; icing test; technology review

飞机在飞行过程中常遇到带有过冷水的云层，当机翼表面温度达到 −10 ℃ ~0 ℃时[1-2]，飞机表面会有冰积聚，外表形状和表面粗糙度的改变大大降低飞机的升阻比[3-4]，影响飞机稳定性和操纵性，从爬升率、航程、续航能力、最大速度来看，少量到中等的结冰通常会导致飞机性能下降[5]。且在碎片冰进入发动机以后，将损坏飞机，危害飞行员和乘客的人身安全，当风挡和雷达罩结冰时，会阻挡飞行员视野，影响通讯信号，背风面形成冰也可能导致无法收回可移动的缝翼、襟翼等，据美国联邦航空管理局(FAA)统计得知，2003—2008 年之间全球的飞行事故因结冰导致的有 380 起[6-7]，航空界认为飞机结冰是影响飞机航行的六大原因之一，美国国家航空航天局(NASA)认为飞机结冰是需要优先防患的问题，FAA 和 NASA 都表达了对扩展积冰数据库的需要[8-11]。

飞机翼面积冰试验主要有结冰风洞试验和飞机自然结冰飞行试验，是现有最科学、最高效地模拟飞机在航行过程中积冰情况的方法[12]。结冰风洞试验是用结冰风洞模拟飞机结冰时所处的空域气象环境，复现飞机实际飞行中的结冰状态，测量记录模型机在该情况下飞行时的积冰厚度、积冰部位、积冰形态；飞机自然结冰试验是指是飞机在自然结冰试飞阶段由试飞机在含过冷水的环境中飞行产生聚积冰。飞机翼面积冰试验结果可为设计飞机防、除冰系统提供参考，保障了雨、雪、雾等恶劣情况下的飞行安全。由于冰是透明无色固体，表面透明反光且易融化，大部分光学仪器或厚度测量仪器均不适合冰层厚度测量，测量积冰厚度成为试验中的难点，现通常采用直接安装在飞机表面的结冰探测器或结冰完成后冰形间接测量积冰厚度的方法来进行探测。

本研究针对飞机翼面结冰试验积冰厚度测量困难的问题，结合各领域结冰传感器和常用积冰测量方法[13-15]，根据物理原理可将它们分为直观法、谐振法、光学法、电学法、热学法、波导法和混合法。

1　直观法

1.1　目测法

目测法是最早人们观测结冰时采用的最简单直接的办法，观测人员间接或直接观察被测表面是否有结冰，英国 Normalair-Garrett[16-17]结冰探测系统，将一个对结冰环境极其敏感的薄翼探针放在方便飞行员观察的位置[18-19]。当飞行员观察到探针上的冰达到了除冰标准时，就控制除冰系统除去飞机表面的冰，且探针内部也设计有加热装置以维持探针的重复使用性，底部照明灯使它在夜间和阴天也可以被飞行员观测到。国内的民用飞机试飞时在垂直于机翼的面上安装有圆盘形标尺，根据冰表面相对于标尺的位置可以判断出积冰厚度，不用任何电子原件就可以清晰明了地观察到。用这种方法来观测结冰厚度可靠性高且简便，但是精度和灵敏度都不高。

英国的 Dunlopb 公司研制出湿运行防冰系统[20]，直接在需要防冰的表面安装多个温度传感器，通过探测环境温度是否满足积冰要求来估计安装表面是否有冰积聚，使升温的电子元件持续工作，保证受保护区域的表面温度高于水滴结冰温度，这种方法耗能较高，且因无法准确探测结冰厚度和结冰情况，造成资源浪费，现已基本被更先进的探冰除冰方法替代。

1.2 摄像法

摄像法在结冰之后直接拍摄下实时的积冰图像，再将拍摄的图像简单处理，测量出积冰厚度，是比较早使用的三维测量方法。FMC 航空器件公司开发的结冰探测系统，可以使用滤光器，按反射光谱信号不同将液态水和固体冰区分开来，再经过图像处理标明积冰区域，从而达到探冰目的。加拿大国家研究委员会的 Struk 和 Lynch 采用拍照和录像的方式，以及 NASA Spotlight 软件对高空研究试验设施(RATFac)进行结冰试验，测量出结冰的厚度和增长速度，如图1所示[21]。1999 年 Porsmouth 大学的 COLLIER 也进行了此类研究，如图2所示，根据试验研究发现，其测量结果精度接近 ±0.4 mm，且经过调整获得了较高的表面清晰度[22]，1997 年 ADDY 使用摄像法绘制出的冰形如图3所示[23]。

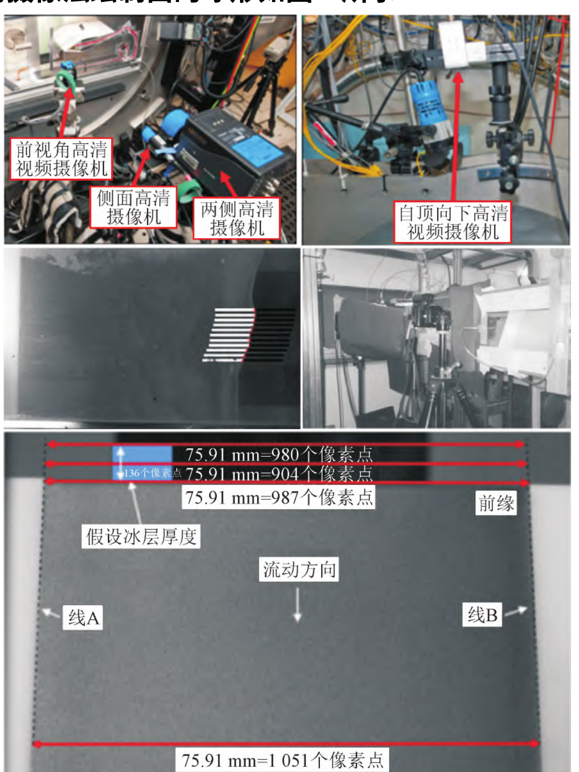


图1 RATFac 结冰试验实物图及图像处理[21]

Fig. 1 RATFac icing test picture and image processing[21]

通过相机记录热刀切割后的结冰截面轮廓的方式为截面摄影法，与下面将提到的手绘法类似，这种方法虽然减少了人为误差，但热刀仍然会破坏冰形，且需要在截面测量处设置确定比例尺的参照物，由于明冰透明无色的特点，拍摄明冰时需要提前进行特殊处理。

2007 年华中科技大学提出一种基于 Sobei 算子、LOG 算子、Canny 算子的测量方法，通过对冰截面进行摄像获取冰截面边界，采用滤波、边缘检测和边缘连接等数字图像处理的方法弥补了在边缘提取和距离调整上的误差，可以较好标定边缘轮廓，精确提取边缘各点来计算结冰厚度，提高了测量结果的精度和分辨率[24-25]。



图2 COLLIER 搭建试验台及结冰翼型截面照片[22]

Fig. 2 Photo of COLLIER test stand and icing airfoil section[22]

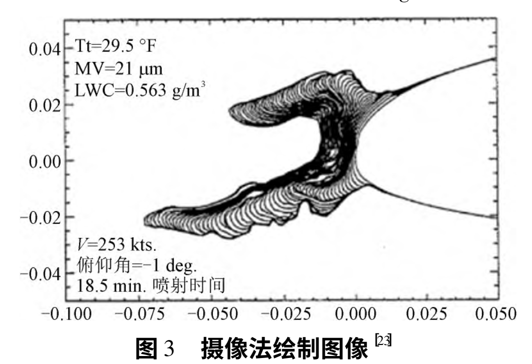


图3 摄像法绘制图像[23]

Fig. 3 Image drawing by camera[23]

1.3 红外阻断法

红外阻断法通常以探针的形式安装在机身外[26]，当红外光源和接收元件之间没有结冰时，红外光源发出红外激光后，接收元件立刻收到全部红外信号，若有结冰时，红外线穿过冰层被接收器接收，相比于没结冰时有所减少，能量有所损耗，且结冰越厚，能量消耗越多，接收到的红外信号越少电压逐渐增加，并向信号处理电路发出信号，传递给显示器，当冰厚增加到一定值，红外线将全部无法穿过冰层，接收元件不再接收到红外信号，输出电压达到峰值，传递信号给控制电路，加热器工作，开始除冰，如图4所示。

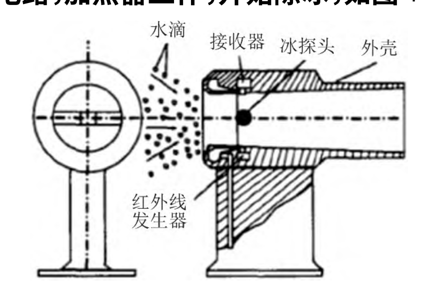


图4 红外阻断法结冰传感器结构图[18]

Fig. 4 Infrared blocking method icing sensor[18]

这种传感器可以反复工作，自动化程度高，但精度和灵敏度都比较低。这种方法对高速飞行时误差较大，但可运用到民机上，目前已有英国的 PENNY&GILES 航空航天有限公司投入生产[27]。

1.4　障碍法

英国的 Lucas 航空公司研制出的 Lucas Mk3 系列结冰探测器是依据结冰后冰层增大运动部件的阻力矩的原理设计[28]，如图 5 所示。

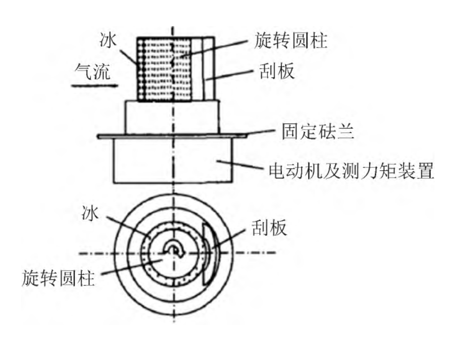


图 5　障碍法结冰传感器结构图[18]

Fig. 5　Obstacle method icing sensor[18]

该传感器上部是一个安装在探测表面上的由电机驱动的保持转动的圆筒，紧贴着旋转圆筒的圆板暴露在可能结冰的过冷气流中，当圆板上有冰积聚时，冰的存在会增大圆筒转动的阻力矩，圆筒转动所需的转矩高于原定转矩，转换为电信号发送至信号总控制系统，这种方法可以有效探测是否结冰，但是无法定量反映结冰程度，且寿命较短，可靠性较低。

1.5　手绘法

手绘法又称热刀法，属于截面轮廓法的一种，实现了飞机结冰外形的数字化过程[29-30]，首先选定待测截面，在此处用提前烧热的金属薄片或是热刀沿着机翼法线方向融化冰，切割出一条凹槽，然后在这个凹槽处放入一个按照机翼前沿弧度提前预制的绘板，在绘板上绘制出固体冰边界，要注意迅速且小心，不能使冰融化或破坏冰的形状，如图 6 所示，最后对手绘结果进行测量标定并通过计算机处理可得到二维冰形，对多截面提取二维冰形，可估计出机翼积冰三维冰形。这种方法最简单直接，比较常见，但由于人的绘制习惯不同，手绘结果相对粗糙，数字化过程中产生误差，且在绘制过程中可能有冰脱落或融化[31]，误差比较大，若测量部位较多，则工作量大，工作效率低。



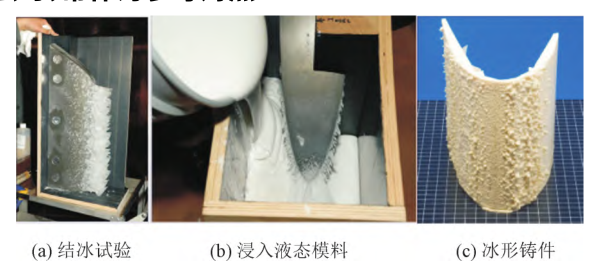
(a) 在待测截面切割细槽　　(b) 手绘冰形

图 6　手绘法[32]

Fig. 6　Hand drawing method[32]

1.6　铸模法

铸模法开始于 20 世纪 70 年代，通过铸造的方式来复刻三维的机翼结冰的冰形模型[33]，如图 7 所示。首先将结冰试验结束后的机翼模型需要的研究部位浸入处于结冰温度的液态模料中，方式冰融化破坏冰形，待模料凝固以后，去除机翼模型，在其中注入凝固时间和硬度都符合要求的铸料就可以得到冰形复制品，将铸件和原模型测量比对，即可得出各部位结冰厚度值。该方法要求对冰形有良好的再现性，且具有较好的低温性能和合理的周转时间[34]，这种方法可以得到整个模型所有部位的结冰情况及厚度，但是耗时且成本很高，应用范围局限，在厚度测量试验中运用较少，由于其对冰形的良好再现性和记录完整性，在各研究单位开发新兴冰形测量方法时，常作为参考对照。



(a) 结冰试验　　(b) 浸入液态模料　　(c) 冰形铸件

图 7　铸模法提取机翼冰形[35]

Fig. 7　Extract ice shape by casting method[35]

2　谐振法

2.1　磁致谐振法

磁致伸缩效应是铁磁性的磁致伸缩材料由于磁场变化沿着磁化方向具有伸长和缩短的振动特性，这就是磁致谐振式结冰传感器原理，有冰积聚的磁致伸缩材料振动固有频率相对于原始状态改变，使激振电路的谐振频率也发生变化，以此来确定结冰状态，并通过消除杂散振动以提高过程精度防止损

坏[36]。国内的哈尔滨工程大学研制出的此类磁致谐振探测系统结构原理如图 8 所示[37]，主要基于下面的 Rosemount 结冰传感器改进设计。

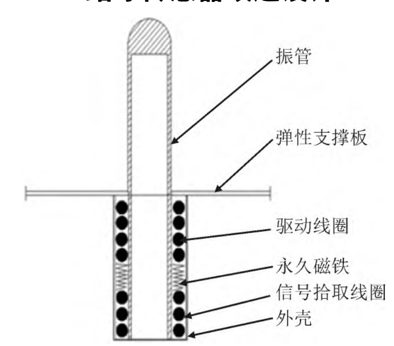


图 8 哈尔滨工程大学磁致谐振式结冰传感器结构原理图[37]

Fig. 8 Magnetostrictive icing sensor of Harbin Engineering University[37]

北美大部分商用飞机都搭载了 Rosemount 公司的结冰探测器[38]，该探测器早在 20 世纪 60 年代末就已被开发出来，可用于气象站冻雨探测和飞机积冰探测[39-40]，经过长期使用，试验测试，数据收集[41]，已经发展为较成熟的磁致谐振类结冰传感器，其原理图如 9 所示[42]，已由美国科罗拉多州博尔德国家大气研究中心在试验室和风洞研究中证明了其高灵敏度、响应快速、测量准确的特点，加拿大气象局云物理研究部对 38 次进入冬季风暴中的飞行中采集到的数据分析证明了该传感器信息传递的准确性[43]。

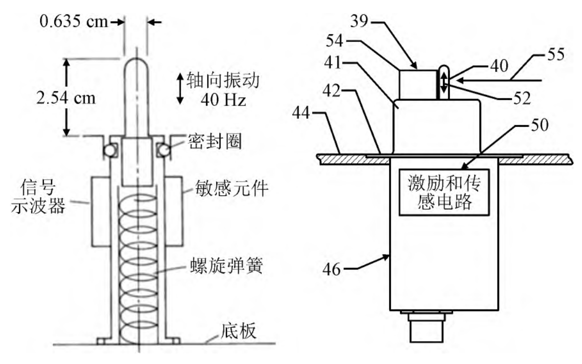


图 9 Rosemount 公司磁致谐振式结冰传感器结构图[33]

Fig. 9 Magnetostrictive icing sensor of Rosemount Inc[33]

2.2 压电谐振法

与压电平膜式结冰传感器相似，压电谐振式结冰传感器敏感元件的谐振频率与刚度和质量之间存在的函数关系[44-46]，该传感器即基于此原理开发。当金属膜片上结冰对传感器的刚度和质量都产生影响，而刚度对膜片的影响大于质量对金属膜片的影响，结冰越厚，膜片刚度越大，传感器谐振频率越高[47-48]，通过谐振频率改变程度来判断传感器上是否结冰以及结冰厚度。华中科技大学研制出的传感器结构如图 10 所示，经实验测定，测量灵敏度可以达到 0.1 mm，测量范围为 0～2.0 mm[49]。

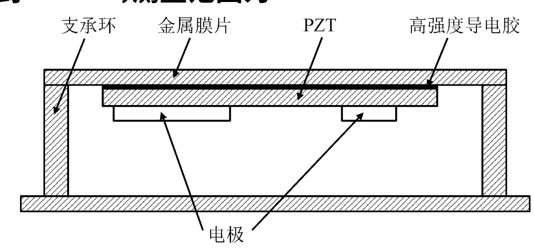
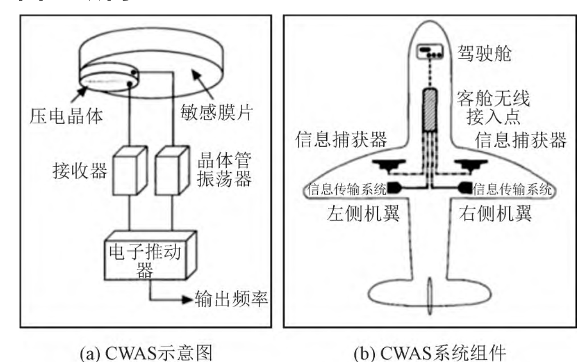


图 10 压电谐振式结冰传感器结构图[49]

Fig. 10 Piezoelectric resonant icing sensor[49]

1993 年芬兰的 Finnair 航空公司和瑞士的Vibro-Meter 公司一起研发了一种明冰探测系统(CWAS)，如图 11 所示。



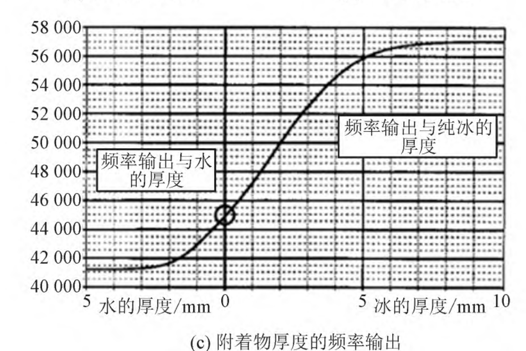


图 11 CWAS 原理图[50]

Fig. 11 CWAS schematic diagram[50]

CWAS 的敏感元件是一个膜片，可嵌入式安装在飞机表面，这种膜片的厚度和刚度均可以通过加工和材料来控制，压电元件受到面载荷作用时发生物理变化可用于像振膜输入功率并维持共振，适当的元件、隔膜和材料特性的尺寸可以使压电元件将隔膜保持在谐振状态，当隔膜表面有液体存在时，导致隔膜承受质量增加，刚度发生变化，共振频率显著减小，且冷冻液体的厚度与隔膜和冷冻层的机械参数保持函数关系，检测冰层厚度为 0.2～10 mm，测量精度可达 0.05 mm 可以清楚区分水和冰，且安装

有温度传感器(WITS)提供辅助探测功能,亦可对传感器进行加热以重复使用[50-51]。

3　光学法

3.1　光纤法

光纤式结冰传感器的出现,对于飞机的探冰和防冰都具有重要意义[52]。2003 年英国率先研制出光纤式的结冰传感器,该传感器安装与模型表面平齐,光纤反射传输红外光到被测表面,若无冰积聚,红外光则直接射入空气中,内部的接收器接收不到反射的红外光,若有冰积聚,光穿过冰层到达接收器,接收器传递电信号给控制电路,以此来判断被测表面有无结冰,该方法可以根据不同种类冰的光学特性,来判断结冰厚度,区分冰形。后来研发出一种透射式的光纤结冰传感器,这种传感器无法齐平安装在被测表面,被测表面没有冰积聚时,光源发射的光可以直接通过接收光纤被接收器全部接收,当被测表面有冰积聚时,发射光纤发射的光穿被冰层损耗后只有少部分光能进入接收光纤被接收器接收,通过分析计算接收到的光强与电信号的数学关系,探测被测表面是否有冰积聚以及积冰厚度,与红外阻断法类似,原理图如图 12 所示。2022 年西班牙国家航空航天技术研究所(National Institute of Aerospace Technology,INTA)开发出的光纤式结冰传感器在雾凇冰条件下精度较高、响应快速,但难以给出冰层厚度的可靠值[53-54]。

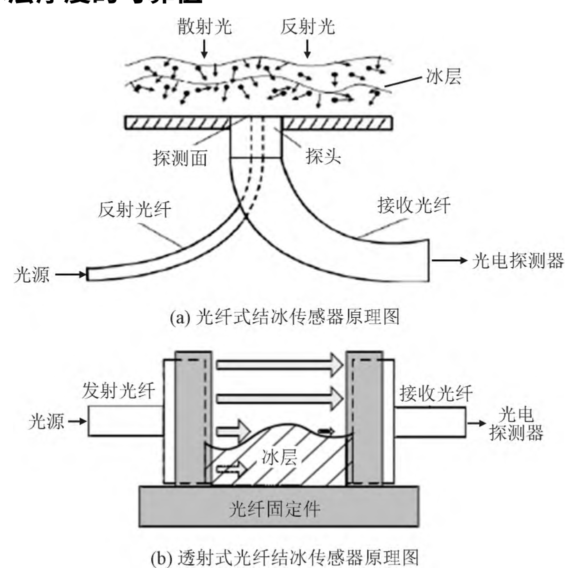


图 12　光纤式结冰传感器原理图[53]

Fig. 12　Optical fiber icing sensor[53]

华中科技大学 2009 年开发了双头光纤式探冰传感器来改善传统光纤式结冰传感器无法对水和冰进行区分的问题,利用条纹状外层对光纤传输容量的影响来区别固体冰和液态水,如图 13 所示[55]。2011 年对该传感器进行改进,研发新的光纤反射式探测器和透射式探测器,分别采用小圆头、楔形光纤探头和矩形光纤探头(如图 14 所示)[56]。图中 1 为发射光纤,2、3 为接收光纤,且光通量相等,背景光等干扰光在后续控制电路中消除,同量级信号增大;透射式探测器中,光纤做成矩形条状,红外光在圆形光纤和矩形光纤之间反射转换。反射式光纤传感器对冰形比较敏感,灵敏度高,精度高,但最大测量值不超过 3 mm,且元器件多,加工难度大;透射式光纤传感器灵敏度高,最大测量值可达 15 mm,信号处理电路相对简单,成本低,但对冰形不敏感,精度低。

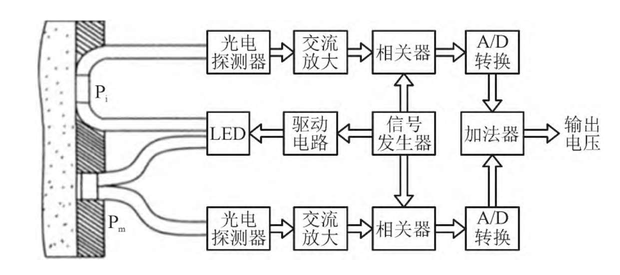


图 13　双头光纤式结冰传感器系统框图[57]

Fig. 13　Fiber-optic double-probe icing sensor[57]

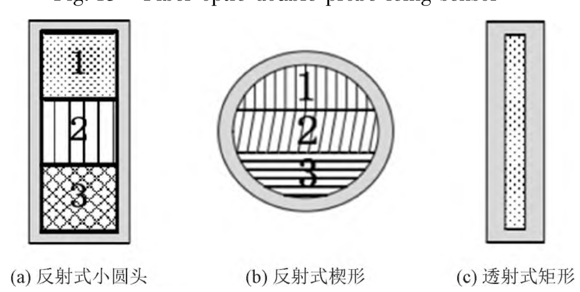


图 14　光纤探头结构图[56]

Fig. 14　Fiber optical probe[56]

和纯电学方法设计的应变式传感器不同的是,美国俄亥俄州 Cincinnati 大学 2000 年开发了一种用微机电系统(micro-electro-mechanical systems,MEMS)技术制造的光交互器件,融合了光纤和压力传感器,比电交互器件更能适应多变工作环境,硅经过加工形成压敏隔膜,硅隔膜的表面和玻璃-空气的界面形成了一个法布里-玻罗腔[57-58]的反射器,加固外壳保护传感元件和将光传输到法布里-玻罗腔的光纤。在图 15 所示的光纤中[59],反射光在腔中多次发射后再通过原光纤返回。这种传感器集合了光纤传感器和压力传感器的优点,已试验证明了其良好的线

性度、灵敏度和响应速度,这一研究在接下来结冰传感器的发展中起重要作用。

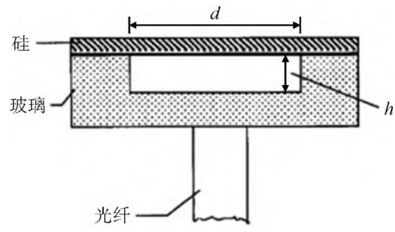


图 15 光纤式压力传感器结构图[59]

Fig. 15 Fiber optic pressure sensor[59]

光纤法具有重量轻、精度高、抗干扰能力强、测量范围较广、尺寸小、信号传输性能好的特点,且非有源系统,可以齐平安装在探测端面,不影响物体表面流场,可以安装在机翼上的敏感、危险区域,是目前航空界主要发展的结冰探测技术之一,而努力缩小它的体积、增强它的耐磨性、延长它的使用寿命并保证原有灵敏度和精度,成为了研究人员的下一个目标。

3.2 红外激光法

红外光在空气和传输光的器件中传播后,被红外接收器接收,接收器将红外光转换为电信号,电信号经过处理显示出结冰图像,红外图像反映了被测物的温度和发射率[60-61]。2009 年 EREN 等[62] 最早提出可以用红外激光扫描测量透明玻璃等物体外形。根据红外光在冰、水、霜中的穿透深度不同,西北工业大学开发出红外激光点三维扫描装置,用于扫描结冰模型的外形,计算积冰厚度,搭建的测量装置如图 16 所示,这种装置输出波长为 10.6 μm,该波长的激光在冰或水里穿透深度小于 10 μm,后又改进为红外激光线扫描方式,以弥补点扫描测量效率较低的问题[63],如图 17 所示。

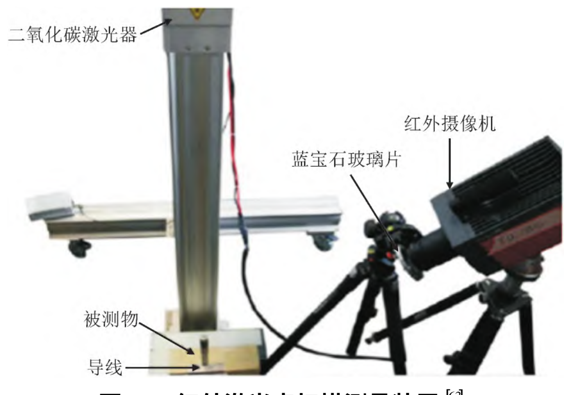
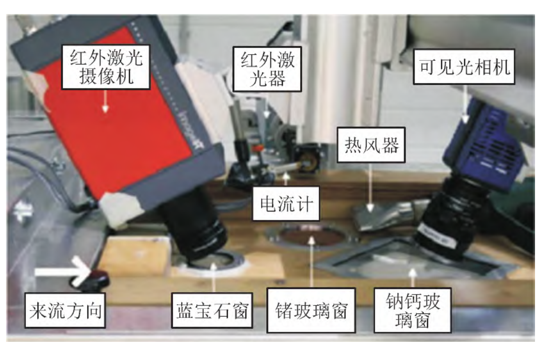


图 16 红外激光点扫描测量装置[63]

Fig. 16 Infrared laser dot scanning measuring device[63]

这种测量方式测量范围非常广,灵敏度高,精度高、测量速度快,但只能获得被测物体外形,需要通过计算得到积冰厚度,且需要将点云配准和曲面重构,后处理过程较复杂。



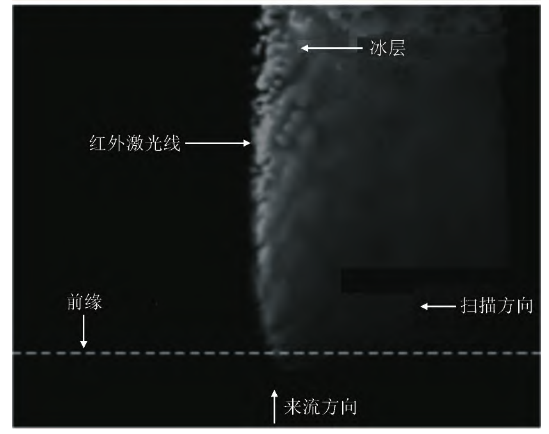


图 17 红外激光线扫描测量装置[63]

Fig. 17 Infrared laser line scanning measuring device[63]

这种测量方式测量范围非常广,灵敏度高,精度高、测量速度快,但只能获得被测物体外形,需要通过计算得到积冰厚度,且需要将点云配准和曲面重构,后处理过程较复杂。瑞典的 Science 公司基于红外光谱技术开发了一种路面结冰探测器[64],探测器发射红外光到待测路面,根据反射回来的红外光线判断路面是否结冰,该设备可以分辨出距离安装点 3 ~ 5 m 处的多种不同路面情况,包括积冰、积雪等,如图 18 所示。



图 18 Science 路面结冰传感器实物图[64]

Fig. 18 Road ice sensor of Science Inc[64]

3.3 激光法

1998 年美国公开了一种检测器可用于检测冰、

水、霜或其他固体，由被探测的透明介质作为感测表面，固体或液体可以附着在被测表面，辐射发生器将辐射发射到介质的一侧，辐射接收器从另一侧接收发射的辐射，将信号传递给接收电路来鉴别表面是否有冰积聚，电磁辐射可以是可见光或是其他辐射[65]。

激光式结冰传感器是利用可见光的光学性质，光源发射出可见光激光到探测表面，当表面有冰积聚时，激光在表面发生散射、透射和反射，入射角固定时，没有结冰发生，接收器主要探测到的是散射光，通过结冰和没有结冰是接收到的光的不同和反射系数去判断探测表面是否有结冰，结冰厚度情况，但由于明冰透明的特点，所以在扫描前通常会在表面喷漆处理，以降低其透明度，激光扫描构型原理如图 19 所示。

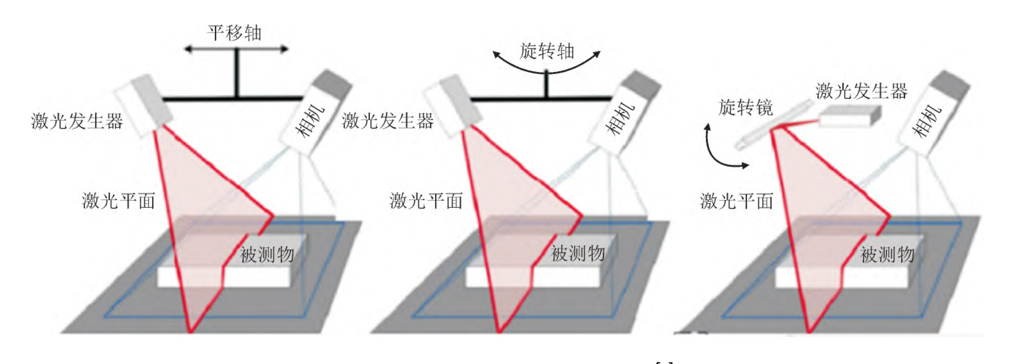


图 19　激光线扫描仪常见构型[66]

Fig. 19　Common configuration of laser line scanner[66]

西北工业大学研究的激光线扫描方式是通过可以产生片光的激光器发射激光到被测物体表面，反射光线由记录激光条纹的相机接收，如图 20 所示，针对明冰表面反射率较低的问题，提出对明冰表面附霜处理的方法以提高其反射率，根据激光线变形与距离和景深密切相关的原理，计算出被测物体的剖面轮廓，通过改变激光器和被测物体的相对位置，得到被测物体整个表面形状的三维数据，再用 Matlab 进行点云重构和曲面配准处理采集到的三维数据，即可得到冰形模型和结冰厚度数据，处理前后图像数据如图 21 所示。

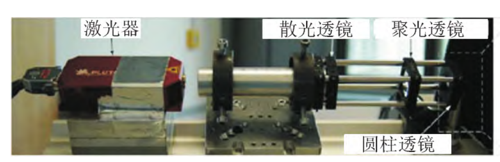




图 20　激光线扫描系统[63]

Fig. 20　Laser line scanning system[63]

美国 NASA 的 Glenn 研究中心在 2014 年就已证明了可见激光线扫描技术扫描结冰外形的精确度和可靠性，使用的 Romer Absolute SI 激光线扫描仪为 0.03 mm[67] 如图 22 所示，Pennsylvania 大学的恶劣环境旋翼试验台使用的 NextEngine 地面固定式激光线扫描仪精度为 0.13 mm[68]，但为防止冰面发光产生噪点或激光在冰层中透射率较高产生误差，扫描测量前可在冰层表面喷涂基于二氧化钛的显像剂。

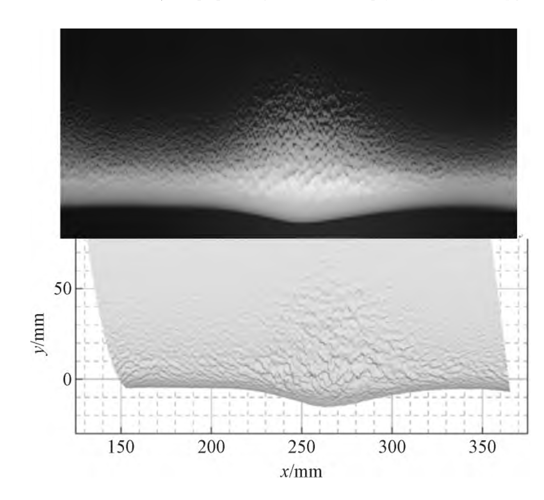


图 21　实际冰形与扫描结果对比[63]

Fig. 21　The actual ice shape compares with the scan results[63]

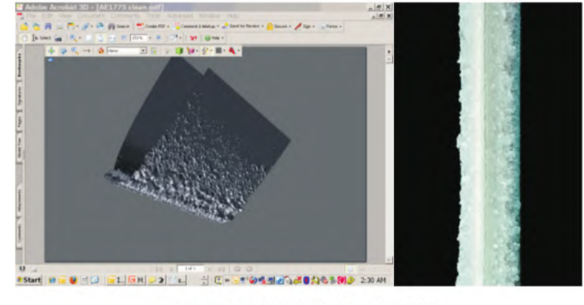
芬兰的 Visala 公司研发了一种激光式的结冰传感器（DSC111），主要用于路面探测，可以测量安装点距观测点 2～15 m 范围内的所有对象，水层厚度测量范围 0～2 mm、冰层厚度 0～2 mm、雪层厚度 0～10 mm，如图 23 所示。Goodrich 公司和 Scanmatic 公司合作开发的激光路面结冰传感器（LRSS）根据不同路面附着物光学特性不同、且敏感波长不同的原理，基于 Goodrich 应用在飞机结冰传感器上的技术[69]，检测结果如图 24 所示。



(a) 喷涂显像剂　　(b) 喷涂后冰形



(c) 激光线扫描　　(d) 扫描冰形



(e) 激光线扫描结果与实际冰形对比

图 22　Romer Absolute SI 扫描流程及结果[34]

Fig. 22　Scanning process and results of Romer Absolute SI scanner[34]



图 23　DCS111 实物图[64]

Fig. 23　Photo of DCS111[64]



图 24　LRSS 检测结果[64]

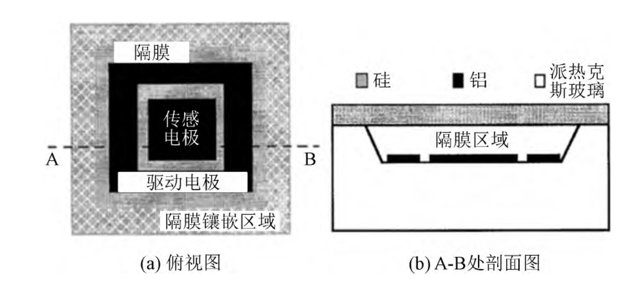
Fig. 24　Test results of LRSS[64]

4　电学法

4.1　电容法

电容的大小与电极几何形状和介电常数有关，不同介质的介电常数不同[70]，传感器内附着有冰或者水时，介电常数会发生变化，传递的电信号也改变，从而判定介质的种类，同时电容变化量与介质厚度有关，也可依据电容增量与介质厚度的函数关系来判断介质种类和积冰厚度[71]。

早在 1998 年，美国 Case Western Reserve 大学微制造试验室就提出了一种基于 MEMS 工艺开发的电容式结冰传感器[72]，采用了由硅硼铝耐热玻璃制造的微型膜片作为敏感元件和便携式电容探测电路，对微型膜片进行适当保护包装保持膜片两侧压力平衡，使其可以抵抗严重结冰条件并保持运行可靠性，如图 25 所示，当激励电极和膜片之间施加电压时，静电引力将导致膜片朝着感测电极向下变形，从而增加电极和膜片之间的电容，当膜片有冰附着时，膜片刚度增加，电压比无冰附着时有所增加，通过检测与隔膜连接的监控接口电路的电信号变化，来检测结冰情况。



(a) 俯视图　　(b) A-B处剖面图

图 25　微型结冰传感器结构图[72]

Fig. 25　Miniature icing sensor[72]

太原理工大学研发的电容式结冰传感器有多组相邻的电容器平行排列，利用电容器的电容值不同来区分冰和水，区分水和冰水混合物时还需要用温度传感器辅助。NASA 专利中的结冰传感器系统包括 a、b 两种电容传感器和一个温度传感器，如图 26 所示，电极之间绝缘以免由导电物质或电解质引起虚假读数，电极之间电容由电极之间的几何形状和间距以及附着物质的介电常数决定，电容值可以表征水和冰的存在甚至冰的厚度，a 型电容传感器是栅格结构，电极与电极之间空隙小，只能检测很薄的冰厚度，超过阈值时，传感器值不发生变化，是系统

能探测到的最小值，b 型电容传感器电极之间间隙比较大，响应与冰厚度呈线性关系，达到最大值时，冰厚增加但系统输出值不发生变化，温度传感器测量温度可判断影响电容传感器变化的物质是冰或水，可测量厚度为 0.5～1.5 mm，工艺简单，价格合理，但灵敏度和精度不高[73]。

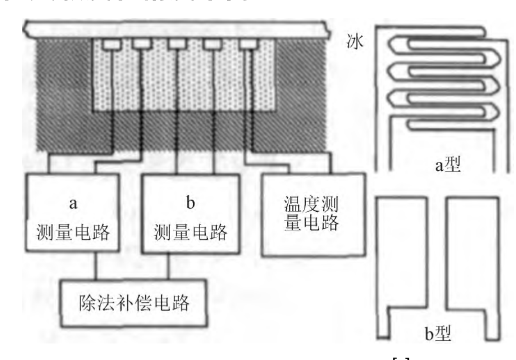


图 26　电容式结冰传感器[18]

Fig. 26　Capacitive icing sensor[18]

4.2　应变式

传统的结冰探测技术通常尺寸较大，且安装程序、装配过程都比较复杂[74]，在飞机运行期间可能对流场造成影响，故小尺寸、灵敏度高、可嵌入的基于 MEMS 工艺的结冰传感器成为了近几年结冰传感器的重要研究内容[75]。

中国科学院电子学研究所改进美国 NASA 的电容式结冰传感器，基于 1880 年皮埃尔和雅克·居里发现的压电效应和逆压电效应，设计一种应变式结冰传感器，如图 27 所示。R_D用于检测平膜表面应力变化，R_F是参考电阻，R_F与 R_D构成双臂电桥，R_M作为融冰电阻，检测到积冰后立即接通，电阻发热将传感器表面的冰融化，当平膜表面结冰时，随着冰层厚度增加，平膜变形，正面拉应力大小随结冰厚度增加而减小，R_D检测到最大应力变化，将应力变化转化为电信号，计算处理后可推得冰层厚度，传感器中平膜厚度仅 60 μm，灵敏度优于 0.1 mm，MEMS 应变式结冰传感器灵敏度高，检测容易且可靠性高，制作工艺简单，可与探测表面齐平，但抗干扰能力较弱[76]。

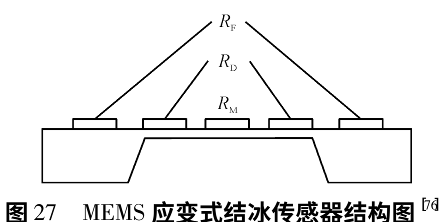
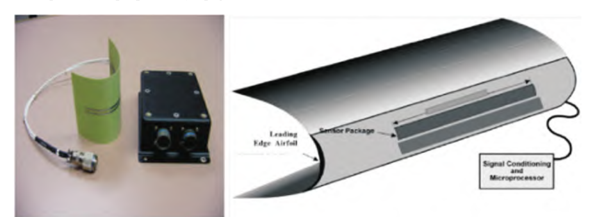


图 27　MEMS 应变式结冰传感器结构图[76]

Fig. 27　MEMS strain type icing sensor[76]

4.3　阻抗式

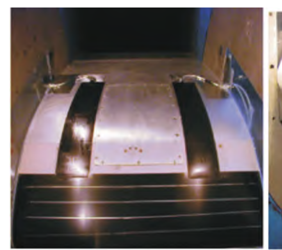
Goodrich 航空航天公司（即以前的 Rosemount 公司）是开发和制造航空用防冰探冰传感器的领导者，2003 年成功开发并测试了冰/无冰传感器系统（INISS）[77-78]，如图 28 所示，主要安装在机翼前缘进行大面积积冰厚度测量，当传感器上有水、冰附着时，会增加传感器阻抗，经过 Goodrich 公司试验（图 29），传感器测量值变化范围可用于区分积冰和其他附着物，如图 30 所示。



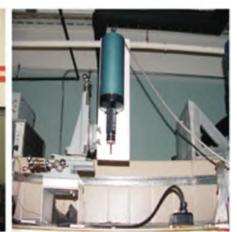
(a) INISS实物图　　(b) INISS安装图

图 28　INISS 冰/无冰传感器系统[77]

Fig. 28　INISS ice/ice-free sensor[77]



(a) INISS安装在蒙皮　　(b) INISS安装在迎风面

(c) INISS数据采集系统　　(d) 光学厚度测量元件

图 29　INISS 性能验证试验[77]

Fig. 29　Performance verification test of INISS[77]

这类传感器可以整体安装到机翼前缘，具有曲面探冰能力，且可根据测量部位的不同定制传感器，完整保留了飞机的气动性能，灵敏度好，可检测的冰层在 0.02～0.03 in 之间，检测范围比较小，还在发展中。

2002 年美国公开的专利中，一种冰检测器通过敏感元件阻抗的变化，来判断飞机表面受否结冰以及测量结冰厚度，以控制机翼除冰装置进行除冰[79]，这种方法改善了电容式结冰传感器中易受水影响的问题，且不需要温度传感器进行辅助，降低成

本并简化电路(图 31),提高了可靠性,值得一提的是其外形的多样性,不受曲面限制,对飞机气动性能影响小。

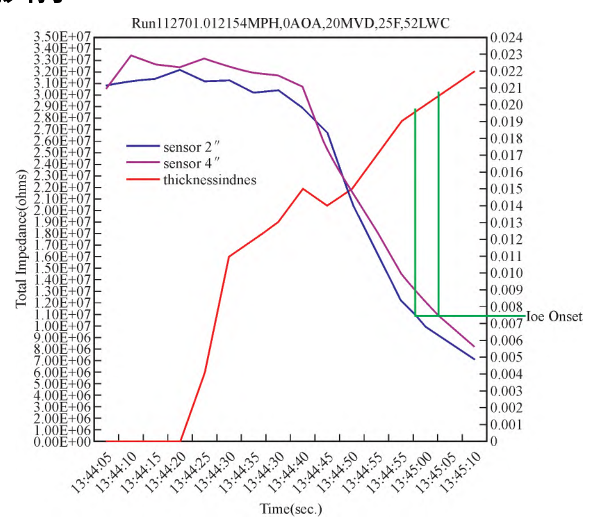


图 30 INISS 阻抗测试曲线[63]

Fig. 30 Impedance test curve of INISS[63]

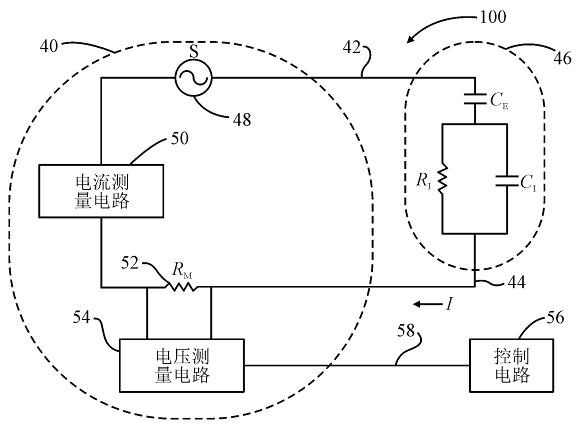


图 31 阻抗式结冰传感器测量电路图[79]

Fig. 31 Measurement circuit diagram of Impedance type icing sensor[79]

5 波导法

5.1 超声法

现有的两种超声法分别采用脉冲幅值技术和脉冲-回波技术[80]。脉冲幅值技术采用压电陶瓷晶体作为发射器,通过电信号激励发射一个超声波脉冲到被测物体表面,再由被测物体表面反射回波,恢复初始状态的压电陶瓷晶体也作为接收器接收回波,当被测表面没有冰积聚时,超声波在空气介质中损耗的能量较小,接收到的回波能量最大,但当被测物体表面有冰积聚时,声波中的部分能量被冰层传送冰消耗,受到的回波能量减弱,由此可以探测出被测物体表面是否有冰积聚,但无法获得冰层厚度信息;脉冲-回波技术与脉冲幅值技术不同的是,脉冲-回波技术发射的声波是在冰层中传播,采用两个压电陶瓷晶体,分别作为发射器和接收器,通过测量声波在冰层中的传播时长,结合声波在冰层中的传播速度,计算出冰厚度值。这种传感器测量冰层厚度范围为 0.6~3.8 mm,精度达 0.13 mm,质量轻,可靠性高,可安装在飞机表面,实时测量结冰厚度。

1995 年芬兰发明了一种基于脉冲幅值技术的指示飞机表面结冰的探测器[81],该装置作为测量换能器的细丝状或带状声波导管,该声波导管在一端有超声波发生器,另一端有接收器,且该装置包括了用于结冰情况下测量穿过换能器的超声波脉冲强度和衰减程度的电子装置,且在测量超声波的衰减时同时测量电阻,并电加热融化周围的冰,使该装置能重复多次使用。

5.2 SH 波法

SH 波是弹性体振动过程中产生的剪切波在水平面内的振动分量,通过传感器发出 SH 波在附有冰层的机体中的传播特性来测量冰层厚度,具有灵敏度高、体积小等优点,SH 波能有效检测出与探测表面部分缺陷,由于波可以具有干涉衍射得特性,SH 波能绕过障碍物继续传播,可在工件表面传播,且可长距离传播,南京航空航天大学基于 SH 波设计出一种用于旋翼结构的结冰传感器[82],用有限元分析软件对 SH 波在旋翼中的传播进行了二元有限元仿真验证传感器设计方案可行性。

声板波(acoustic board wave,APM)是一种在板状固体结构中传播的弹性波,大多数时候是指水平剪切 APM 即 SH-APM[83],当声波在输入和输出换能器之间传播时,将能量限制在板的上下表面之间,通过监控输入和输出之间 APM 幅度和相位延迟的变化来判断附着物的类别,当采用声板波进行液体检测时,可选用叉指换能器(interdigital transducer,IDT)沉积在压电基片的一侧,附着物与另一侧接触的形式,使叉指换能器与液体分开,同时声板波不会因液体出现很大衰减,通过研究声板波在自由空间和负载液体时的特征频率,即可判断是否有液体附着。南京航空航天大学通过有限元软件 COMSOL 的模态分析模块建立声板波器件的理论模型[84],从而分析频率特性,通过特征频率随液体特征参数的

变化来实现检测功能，结构如图 32 所示。

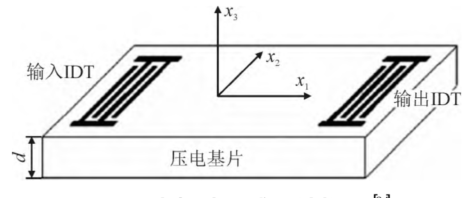


图 32　声板波传感器结构图[84]

Fig. 32　Acoustic board wave sensor[84]

声表面波(surface acoustic wave，SAW) 的实质是 SH 偏振导波，在表面波的情况下，声能主要集中在被测表面，对表面扰动的感知比体声波要敏感得多，通过 IDT 产生声能集中在传感器基底的薄层中，具有高质量灵敏度。现采用的电磁波多为 Love 波，是一种沿 SH 方向振动的电磁波，在冰中的能量损耗远大于在水中的能量损耗，以此可区分附着物种类，Love 波能量在薄层里的集中特性使得其对传播特性的变化的感知比 SH-APM 和纯 SH 都要敏感[85]。美国研制出一种基于声表面波法的微电子机械系统结冰传感器，该传感器通过沉积在衬底和表面之间的叉指型电极来产生 Love 波[86-87]，由于测量的介质本身固有特性影响，波速变化和衰减程度会有所区别，从而区分液态水和固体冰，中国科学院声学研究所在 2008 年初步试验证明了 Love 波结冰传感器可以明显区分附着物，如图 33 所示[88-89]。声表面波传感器体积小、灵敏度高、可无线无源测量，在水和冰分别附着的情况下，能量损耗和频率变化有明显区别，且和冰层厚度保持确定函数关系，可测量冰层厚度。

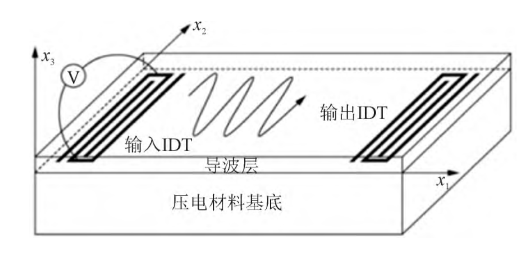


图 33　声表面波传感器结构图[88]

Fig. 33　Surface acoustic wave sensor[88]

2002 年 Pennsylvania 大学研发出无线 IDT 冰传感器，用于检测从水到冰的转变，从而实现远距离探冰，如图 34 所示[90]，利用声表面波对环境敏感、暴露在低温环境中波速发生变化的特点，合理设计声表面波传感器，使其达到微型、可持续探冰的目的。声表面传感器灵敏度高，但制作较困难，还未在实际生活中广泛运用。

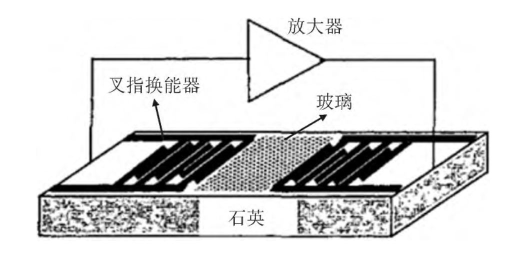


图 34　无线 IDT 冰传感器结构图[90]

Fig. 34　Wireless IDT ice sensor[90]

5.3　微波法

微波法测量结冰厚度可以分为微波谐振法和微波发射法[91]。微波谐振法原理类似于磁致谐振法，当齐平安装在被测表面的波导管绝缘层上有冰或水积聚时，波导管的谐振频率随波导管厚度增加而减小，根据不同的附着物对谐振频率的影响不同的原理，掌握谐振频率关于附着物厚度的函数，可大致计算出冰层厚度，测量范围为 0 ~ 25 mm，空中加油机 Cessna Cruader 303 上率先搭载了这种微波结冰传感器并试验，这种传感器分辨率比较高，且可以辨别出冰层和其他附着物; 微波发射法通常用于海洋结冰探测中，主要基于冰发出的微波辐射与其厚度程正比的原理，发射率主要受冰/空气界面和冰/水界面以及冰厚度的影响，目前微波发射法测量数据的精度和灵敏度都低于可见光数据和红外数据，用于飞机结冰厚度测量时精度较差[92-93]，这种传感器可用于天线罩积冰探测[94]。

6　热学法

6.1　热流法

热流法传感器主要安装在机身表面，测量温度范围广，可测量高速飞行下的机身高温，亦可测量在过冷云层中飞行机身温度[95]。飞机在过冷云层中飞行时，机身外壳的内外两侧存在温度差，壳体内部存在热量传递，参考傅里叶定律，热量沿壁面法向传递时内部存在热流梯度，以及发展出了稳态和瞬态的测量方法可根据不同工况选定[96]，将热流信号转化为电信号传递给控制电路，在达到除冰要求时控制除冰装置自动除冰，并可对比未积冰时的电信号，得出积冰量。2014 年中国空气动力研究与发展中心开发的热阻式热流传感器就是基于这种原理，如图 35 所示[97]。

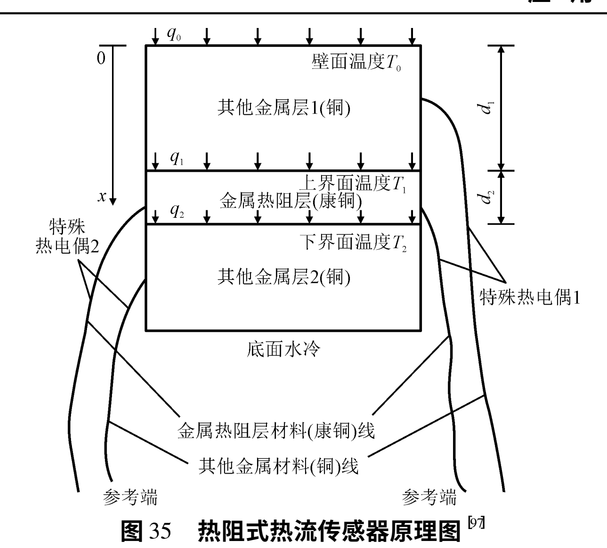


图 35　热阻式热流传感器原理图[97]

Fig. 35　Thermal resistance heat flow sensor[97]

6.2　潜热式

潜热是物质发生相变后吸收或放出的热量，潜热式结冰传感器的原理就是基于此原理，是通过监测加热被测表面冰层完全融化所需要的电阻丝功率来判断的，潜热式传感器主要有电流脉冲方式和恒温方式。电流脉冲方式使用脉冲电流给电阻通电进行加热，探头上没有冰积聚时，温度和电阻值保持特定函数关系，探头上有冰积聚时，冰受热融化，电阻丝热特性改变，温度与电阻值函数关系发生改变，通过这种函数关系的改变程度来判断冰的积聚量，并向控制电路发出信号。恒温方式是一直给电阻丝通电使其保持在恒定温度下，当电阻丝表面有冰积聚时，冰融化吸热，电阻丝表面温度降低，电阻丝为保持原有温度，需加大功率，通过检测功率变化程度判断积冰量。

6.3　平衡电桥法

平衡电桥法采用了电阻随温度改变而电阻值变化的原理，结构图如图 36 所示，传感器呈圆筒状，母线方向与来流方向平行，内部包括两根通过电桥连接的电阻丝，与来流方向平行的电阻丝不参与结冰，用于环境检测，与来流方向垂直的电阻丝用于收集气流中的小水滴，当气流中不含水滴时，两根电阻丝阻值相等，当气流中含有水滴时，水平电阻丝阻值不发生变化，垂直电阻丝表面绝缘层温度发生变化，电阻值和表面温度存在函数关系，电桥平衡被破坏，故可通过二者电阻丝的差值判断气流水滴含量，但无法判断是否有冰形成，需结合温度传感器判断该传感器是否处于过冷环境。

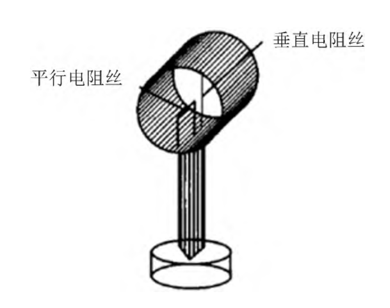


图 36　平衡电桥法结冰传感器结构图[18]

Fig. 36　Balanced bridge method icing sensor[18]

7　混合法

一种结冰传感器在某些环境下可能出现错误报警的不可靠现象，平膜结冰传感器在受到微小扰动时，由于其对质量感知敏感的特点，不会出现错误报警的现象，因此，将两种传感器结合使用，可以取长补短，中国空气动力研究与发展中心低速空气动力研究所就将光纤式和平膜式传感器相结合，将二者组合嵌入 NACA0012 机翼中，如图 37 所示[98]，测量时间不超过 0.5 s，积冰厚度测量范围为 0.2 ~3 mm，这种混合使用传感器的方法可以最大程度发挥两种传感器的优点，互补缺点，具有良好的发展前景。

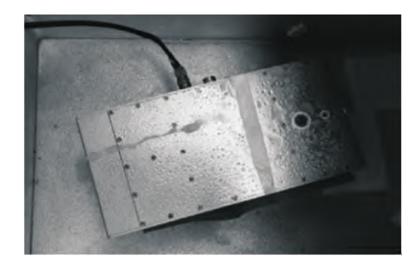


图 37　低温环境机翼测试模型[98]

Fig. 37　Low temperature environment aerofoil test model[98]

8　结　论

由于飞机结冰研究是开发飞机防冰系统的基础，准确地测量结冰厚度的方法是飞机翼面结冰试验中至关重要的部分，早在 19 世纪 20 年代，西方国家就开始了该技术的研究，各个领域探冰技术经过 100 年的发展已逐渐成熟，现有美国 Rosemount 公司的磁致伸缩式结冰传感器和瑞典 Vibro-Meter 公司的平膜式传感器因其较高的灵敏度和准确度，且较早搭载在飞机上参与实际飞行过程，经过长期的实际运用经验积累，现已发展比较成熟，且运用较为广泛; 新兴的光纤法和激光法虽还有一些弊端，但已有

试验证明其在积冰探测中的可行性。对本研究所述各方法优缺点总结如下(表 1)。

对于各方法分别按照定量/定性、在线/离线、有损/原位特点分类如下(表 2)。

结合国内目前的研发成果，翼面积冰探测方法主要面临精度高、测量范围广、耐磨性好和在线测量难以兼得的问题，针对该问题，接下来需在以下 4 个方面开展细致研究工作。

1) 根据安装位置选择。可根据研究对象的不同部位结构特征、积冰特征和传感器的适用范围，在不同部位选择安装最合适的传感器，以保证对流场的影响最小且准确性最高。

2) 新型防冰探冰系统。国外从 21 世纪初就开始开发机载结冰探测系统，旨在基于飞机空气动力学的统计特性和可重构控制来检测和识别飞机结冰，以保护飞机免受危险结冰条件的影响，国内也可将此作为接下来防冰系统设计主要方向。

3) 混合探测。一些探测技术可能在某特殊环境下出现失效的情况，可采用多种传感器混合探测的方式，共同检测，相互对照，弥补缺点，大大提高测量结果的可靠性，需要研究人员根据实际应用工况选择组合合适的探测技术。

4) 开发新型探测方法。从根本技术层面解决该问题，采用新材料、新工艺和新技术，优化现有探测技术，开发新型探测技术，特别是对于现在逐渐受到重视的光纤法和激光法，可着重优化其性能。

表 1　积冰探测方法优缺点对比

Tab. 1　Comparison of advantages and disadvantages of ice accumulation detection methods

物理原理	积冰厚度测量方法	技术优点	技术缺点
直观法	目测法	设计简便、可靠性高、观测清晰明了	精度和灵敏度低，可能影响流场
	摄像法	精度高、可实时测量、可区分水和冰、分辨率高	在拍摄明冰前需要特殊处理、提取截面时会破坏冰形
	红外阻断法	自动化程度高	高速飞行时误差较大、耗能较多、精度和灵敏度低
	障碍法	可有效测量是否结冰	无法定量测量结冰厚度、寿命短、可靠性低
	手绘法	简单直接、可得到二维冰形	精度低、工作量大、效率低
	铸模法	最冰形良好再现性、可得到完整冰形及厚度	耗时、成本高、应用范围局限
谐振法	磁致谐振法	灵敏度高、响应快速、测量准确、信息传递准确	无法定量测量结冰厚度、可能影响试验流场
	压电谐振法	精度高、可区分水和冰、可嵌入式安装在被测表面、可自动加热重复使用	测量范围小、易受温度影响故需安装温度传感器辅助探测
光学法	光纤法	重量轻、精度高、抗干扰能力强、测量范围广、尺寸小、信号传输性能好、不影响物体表面流场	耐磨性差、使用寿命短
	红外激光法	灵敏度高、精度高、测量速度快、完全不影响试验过程、可取得整个表面形状三维数据	需要计算得到积冰厚度、需要点云配准和曲面重构、后处理过程复杂
	激光法	灵敏度高、精度高、可靠性高、测量速度快、完全不影响试验过程、可取得整个表面形状三维数据	需要计算得到积冰厚度、需要点云配准和曲面重构、后处理过程复杂、测量前需要对冰面特殊处理降低透明度
电学法	电容法	工艺简单、成本低、可区分冰和水	精度和灵敏度不高、测量范围有限
	应变式	尺寸小、灵敏度高、可靠性高、工艺简单、不影响试验流场、可自动除冰	抗干扰能力弱
	阻抗式	可区分水和冰、灵敏度高、不影响试验流场、外形灵活、控制电路简单	测量范围小、还在发展中
波导法	超声法	质量轻、可靠性高、精度高、可实时测量结冰厚度、不影响试验流场	测量范围小
	SH 法	灵敏度高、体积小、可长距离传播、可无线无源测量	工艺复杂、易受环境和温度干扰
	微波法	可区分冰和水、测量范围广、不影响试验流场	精度较差
热学法	热流法	测量温度范围广、不影响试验流场	精度低、在结冰领域运用少
	潜热式	可以自动除冰	无法给出结冰厚度值
	平衡电桥法	可判断气流中水滴含量	需结合温度传感器判断是否有冰形成、无法给出积冰厚度
混合法	多种传感器混合使用	最大程度发挥两种传感器的优点、互补缺点	目前使用较少

表 2 各积冰探测方法分类

Tab. 2 Classification of ice accumulation detection methods

分类依据	类别	积冰厚度测量方法
定性/定量	定性	障碍法、热流法、潜热式、平衡电桥法
	定量	目测法、摄像法、红外阻断法、手绘法、铸模法、磁致谐振法、压电谐振法、光纤法、红外激光法、激光法、电容法、应变式、阻抗式、超声法、SH 波法、微波法
在线/离线	在线	目测法、摄像法、红外阻断法、障碍法、磁致谐振法、压电谐振法、光纤法、红外激光法、激光法、电容法、应变式、阻抗式、超声法、SH 波法、微波法、热流法、平衡电桥法
	离线	手绘法、铸模法、潜热式
有损/原位	有损	手绘法、铸模法、热流法、潜热式
	原位	磁致谐振法、压电谐振法、光纤法、电容法、应变式、阻抗式、摄像法、红外激光法、激光法、目测法、红外阻断法、障碍法、超声法、SH 波法、微波法、平衡电桥法

参考文献:

[1] STANKOV B B, BEDARD A J. Remote sensing observations of winter aircraft icing conditions – a case study [J]. Journal of aircraft, 1994, 31(1): 79-89.

[2] JENSEN D P, MOORE D J. An ice detection and control system for fixed and rotary wing aircraft [C]//8th Annual Natl. Conf. Env. Effects on Aircraft and Prop. Syst. Bordentown, NJ: [s. n.], 1968.

[3] RANAUDO R J, BATTERSON J G, REEHORST A L, et al. Effects of horizontal tail ice on longitudinal aerodynamic derivatives [J]. Journal of aircraft, 1991, 28(3): 193-199.

[4] HEINRICH A, ROSS R, ZUMWALT G, et al. Aircraft icing handbook [EB/OL]. [2022.11.04]. https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/ADA238039.xhtml.

[5] BRAGG M B, HUTCHISON T, MERRET J, et al. Effect of ice accretion on aircraft flight dynamics [C]//38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2000.

[6] 李明. 飞机结冰致灾与防护关键基础问题研究——中国空气动力研究与发展中心创新成果 [J]. 科技成果管理与研究, 2019(9): 73-75.

LI Ming. Key fundamental problems of aircraft icing disaster and protection: innovation of China Aerodynamics Research and Development and Development Center [J]. Management and research on scientific & technological achievements, 2019(9): 73-75(in Chinese).

[7] COLE J A, SAND W R. Statistical study of aircraft icing accidents [C]//29th Aerospace Sciences Meeting. Reston, VA, USA: AIAA, 1991.

[8] 唐扬刚, 吴敬涛, 邓文亮. 过冷大水滴撞击结冰特性实验研究 [J]. 低温工程, 2022(4): 42-48.

TANG Yanggang, WU Jingtao, DENG Wenliang. Experimental study on impacting icing characteristics of supercooled large droplets [J]. Cryogenics, 2022(4): 42-48(in Chinese).

[9] 唐扬刚, 张惠, 吴敬涛. 结冰条件下直升机飞行风险模糊综合评估 [J]. 装备环境工程, 2020, 17(11): 79-84.

TANG Yanggang, ZHANG Hui, WU Jingtao. Fuzzy comprehensive evaluation of helicopter flight risk under icing conditions [J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(11): 79-84(in Chinese).

[10] 唐扬刚, 唐虎, 吴敬涛. 旋翼结冰对直升机悬停性能影响的数值分析 [J]. 装备环境工程, 2020, 17(2): 104-108.

TANG Yanggang, TANG Hu, WU Jingtao. Numerical analysis on effects of rotor icing on helicopter performance in hover [J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(2): 104-108(in Chinese).

[11] 唐扬刚, 马兰, 任战鹏. 气候环境实验室降/扬雪环境表征方法分析 [J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 52-56.

TANG Yanggang, MA Lan, REN Zhanpeng. Characterization method of snowfall environment in climatic environmental laboratory [J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(7): 52-56(in Chinese).

[12] ZHI X, CHO H C, WANG B, et al. Development of a capacitive ice sensor to measure ice growth in real time [J]. Sensors, 2015, 15(3): 6688-6698.

[13] WEI K X, YANG Y, ZUO H Y, et al. A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine [J]. Wind energy, 2020, 23(3): 433-457.

[14] MADI E, POPE K, HUANG W M, et al. A review of integrating ice detection and mitigation for wind turbine blades [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2019, 103: 269-281.

[15] TROIANO A, PASERO E, MESIN L. A road ice sensor [M]//CARMO J P, RIBEIRO J E. New advances in vehicular technology and automotive engineering. Rijeka: IntechOpen, 2012: Ch. 9.

[16] HOUSE W, SQUARE W. Patran at Normalair-Garrett [J]. Aircraft engineering and aerospace technology, 1988, 60(2): 26-27.

[17] HAMLIN S, HUNT R, TASSOU S A. Enhancing the performance of evaporative spray cooling in air cycle refrigeration and air conditioning technology [J]. Applied thermal engineering, 1998, 18(11): 1139-1148.

[18] 张杰, 周磊, 张洪, 等. 飞机结冰探测技术 [J]. 仪器仪表学报,

2006,27(12):1578-1586.
ZHANG Jie,ZHOU Lei,ZHANG Hong,et al. Aircraft icing detection technology [J]. Chinese journal of scientific instrument,2006,27(12):1578-1586(in Chinese).

[19] BUCKANIN R M,TULLOCH J S. Artificial icing test utility tactical transport aircraft system (UTTAS) sikorsky YUH-60A helicopter [R]. Army Aviation Engineering Flight Activity Edwards AFB CA,1977.

[20] Airscrew Howden Ltd. 'Lynx' product support digest [J]. Aircraft engineering and aerospace technology,1975,47(9):15-39.

[21] STRUK P M,LYNCH C J. Ice growth measurements from image data to support ice-crystal and mixed-phase accretion testing [C] //4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Reston,VA,USA: AIAA,2012.

[22] COLLIER P,DIXON L,FONTANA D,et al. The use of close range photogrammetry for studying ice accretion on aerofoil sections [J]. The photogrammetric record,1999,16(94):671-684.

[23] ADDY H E,POTATPCZUK M G,SHELDON D W,et al. Modern airfoil ice accretions [C] //35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston,VA,USA: AIAA,1997.

[24] 黄琴. 基于图像处理的结冰传感器标定方法的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学,2007.

[25] 叶林,黄琴,张洪,等. 结冰传感器摄像标定方法的研究 [J]. 仪表技术与传感器,2006(11):36-37.
YE Lin,HUANG Qin,ZHANG Hong,et al. Image method for ice sensor calibration [J]. Instrument technique and sensor,2006(11):36-37(in Chinese).

[26] 王起达,王同光. 机翼结冰探测技术进展 [J]. 航空制造技术,2009(3):62-64.
WANG Qida,WANG Tongguang. Development of detecting icing technology for aircraft wing [J]. Aeronautical manufacturing technology,2009(3):62-64(in Chinese).

[27] 刘亚慈,王永忠. 飞机积冰探测技术与方法分析 [C] //第十五届中国科协年会论文集. 贵阳: 中国科学技术协会,2013: 1-5.

[28] HOOVER G A. Aircraft ice detectors and related technologies for onground and inflight applications [R]. [S. l.]: Galaxy Scientific Corporation,1993.

[29] GRAY V H,VON GLAHN U H. Aerodynamic effects caused by icing of an unswept NACA 65A004 airfoil [R]. 1958.

[30] GRAY V H. Correlations among ice measurements,impingement rates icing conditions,and drag coefficients for unswept NACA 65A004 airfoil [R]. [S. l.]: [s. n.],1958.

[31] MILLER D R,POTAPCZUK M G,LANGHALS T J. Preliminary investigation of ice shape sensitivity to parameter variations [C] //43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston,VA,USA: AIAA,2005.

[32] LEE S,BROEREN A P,ADDY H E,et al. Development of 3D ice accretion measurement method [C] //4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Reston,VA,USA: AIAA,2012.

[33] BRAGG M B,GREGOREK G M,SHAW R J. An analytical approach to airfoil icing [C] //19th Aerospace Sciences Meeting. Reston,VA,USA: AIAA,1981.

[34] REEHORST A L,RICHTER G P. New methods and materials for molding and casting ice formations [R]. Woshington D. C.: [s. n.],1987.

[35] LEE S. Status of 3D ice shape measurement effort [C] //2011 Annual Technical Meeting. Houston,TX,USA: National Aeronautics and Space Administration,2011: E-667804.

[36] HILLER M W,BRYANT M D,UMEGAKI J. Attenuation and transformation of vibration through active control of magnetostrictive terfenol [J]. Journal of sound and vibration,1989,134(3):507-519.

[37] 王华,王以伦,张滨华. 基于磁致伸缩原理的结冰传感器设计理论 [J]. 电工技术学报,2003,18(6):77-79.
WANG Hua,WANG Yilun,ZHANG Binhua. Theory of designing ice detector based on magnetostriction [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2003,18(6):77-79(in Chinese).

[38] CRONIN D J,JACKSON D G,OWENS D G. Ice detector configuration for improved ice detection at near freezing conditions: US 10659678 [P]. 2006-09-19.

[39] JACKSON D G,OWENS D G,CRONIN D J,et al. Certification and integration aspects of a primary ice detection system [C] //39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston,VA,USA: AIAA,2001.

[40] HEYMSFIELD A J,MILOSHEVICH L M. Evaluation of liquid water measuring instruments in cold clouds sampled during FIRE [J]. Journal of atmospheric and oceanic technology,1989,6(3):378-388.

[41] COBER S G,KOROLEV A V,ISAAC G A. Assessing characteristics of the Rosemount Icing Detector under natural icing conditions [C] //39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston,VA,USA: AIAA,2001.

[42] BAUMGARDNER D,RODI A. Laboratory and wind tunnel evaluations of the Rosemount Icing Detector [J]. Journal of atmospheric and oceanic technology,1989,6(6):971-979.

[43] COBER S G,ISAAC G A,KOROLEV A V. Assessing the Rosemount Icing Detector with in situ measurements [J]. Journal of atmospheric and oceanic technology,2001,18(4):515-528.

[44] 张袭荣. 基于压电陶瓷的结冰传感器特性分析与研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学,2022.

[45] 甘茂锐,丁力,张进. 某型航空发动机结冰检测技术仿真和验证研究 [J]. 传感器世界,2022,28(5):7-11.
GAN Maorui,DING Li,ZHANG Jin. Simulation and verification of icing detection technology for an aeroengine [J]. Sensor world,2022,28(5):7-11(in Chinese).

[46] 陈前焱. 基于压电阵列的结冰探测方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学,2021.

[47] 张洪,邢科新,张杰,等. 平膜压电谐振式结冰传感器信号检测

方法[J]. 仪表技术与传感器,2006(4):6-8.
ZHANG Hong,XING Kexin,ZHANG Jie,et al. Signal delection of resonant diaphragm piezoelectric ice sensors[J]. Instrument technique and sensor,2006(4):6-8(in Chinese).

[48] 王岩,王渊,朱程香,等. 谐振式飞机结冰探测传感器仿真及实验研究[J]. 南京航空航天大学学报,2022,54(2):267-273.
WANG Yan,WANG Yuan,ZHU Chengxiang,et al. Simulation and experimental study of aircraft icing detection sensor by resonant[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2022,54(2):267-273(in Chinese).

[49] 郑燕,郑英,张杰,等. 压电谐振式冰传感器的结冰试验和数据处理[J]. 计量与测试技术,2011,38(2):1-3.
ZHENG Yan,ZHENG Ying,ZHANG Jie,et al. Piezoelectric resonant icing sensors ice experiments and date processing[J]. Metrology & measurement technique,2011,38(2):1-3(in Chinese).

[50] ELORANTA J T,CARPARELLI D. CWAS - Clean wing advisory system: a new approach to ice detection[C]//31st Aerospace Sciences Meeting. Reston,VA,USA: AIAA,1993.

[51] MAAS D M,MCCOWN N M. Turbine inlet ice related failures and predicting inlet ice formation[C]//ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air. New York, NY, USA: ASME, 2007: 1531-1543.

[52] GE J F,YE L,ZOU J H. A novel fiber-optic ice sensor capable of identifying ice type accurately[J]. Sensors and actuators A: Physical,2012,175:35-42.

[53] GONZALEZ M,FRÖVEL M. Fiber bragg grating sensors ice detection: methodologies and performance[J]. Sensors and actuators A: Physical,2022,346:113778.

[54] FROVEL M,FERNANDEZ-MEDINA MAESO A B,MORA J,et al. System and method for detecting ice formation on a body: US 2021/0316869 A1[P]. 2021-10-14.

[55] 李薇,陈迎春,张淼,等. 基于光波导技术的新型飞机结冰探测系统[J]. 仪表技术与传感器,2009(12):85-87.
LI Wei,CHEN Yingchun,ZHANG Miao,et al. Novel icing detection system based on optical waveguide technique[J]. Instrument technique and sensor,2009(12):85-87(in Chinese).

[56] 熊平. 光纤式结冰传感器气象结冰探测应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学,2011.

[57] TAYLOR H F. Fiber optic sensors based upon the fabry-perot interferometer[M]//2nd ed. YIN S Z,RUFFIN P B,YU F T S. Fiber Optic Sensors. Boca Raton: CRC Press,2017:35-64.

[58] KAO T W,TAYLOR H F. High-sensitivity intrinsic fiber-optic fabry-perot pressure sensor[J]. Optics letters,1996,21(8):615-617.

[59] ZHOU J,DASGUPTA S,KOBAYASHI H,et al. Optically interrogated MEMS pressure sensors for propulsion applications[J]. Optical engineering,2001,40(4):598-604.

[60] 张子恒,姜予涵,彭畅暄. 道路积水结冰检测技术的概述及展望[J]. 山西建筑,2021,47(3):103-105.
ZHANG Ziheng,JIANG Yuhan,PENG Changxuan. Overview and prospect for the technology of water and freezing detection on road[J]. Shanxi architecture,2021,47(3):103-105(in Chinese).

[61] TABATABAI H,ALJUBOORI M. A novel concrete-based sensor for detection of ice and water on roads and bridges[J]. Sensors,2017,17(12):2912.

[62] EREN G,AUBRETON O,MERIAUDEAU F,et al. Scanning from heating: 3D shape estimation of transparent objects from local surface heating[J]. Optics express,2009,17(14):11457-11468.

[63] 龚晓亮. 结冰风洞中冰形生长的光学三维测量研究[D]. 西安: 西北工业大学,2015.

[64] 谭舒亚,葛俊锋,叶林,等. 非接触式路面结冰探测技术研究进展[J]. 公路,2015,60(6):244-249.
TAN Shuya,GE Junfeng,YE Lin,et al. Research progress of non-contract road icing detection technology[J]. Highway,2015,60(6):244-249(in Chinese).

[65] NOACK R J. Ice and liquid detector: US 5,796,106[P]. 1998-08-18.

[66] DROUIN M A,BERALDIN J A. Active 3D imaging systems[M]//PEARS N,LIUY H,BUNTING P. 3D Imaging,Analysis and Applications. London: Springer London,2012:95-138.

[67] 战培国. 国外结冰风洞发展动向综述[J]. 飞航导弹,2020(12):84-88.
ZHAN Peiguo. Review on the development trend of wind tunnel abroad[J]. Aerodynamic missile journal,2020(12):84-88(in Chinese).

[68] HAN Y Q,PALACIOS J L,SMITH E C. An experimental correlation between rotor test and wind tunnel ice shapes on NACA 0012 airfoils[C]//SAE 2011 International Conference on Aircraft and Engine Icing and Ground Deicing. Warrendale,PA,USA: SAE International,2011: 2011-38-0092.

[69] PAULSEN T A,SCHMOKEL P. Laser Road Surface Sensor-LRSS[C]//SIRWEC 2004 - 12th International Road Weather Conference. Germany: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes,Offenbach am Main (Germany). 2004: 40,CD-ROM.

[70] ZHENG D S,LI Z Y,DU Z Y,et al. Design of capacitance and impedance dual-parameters planar electrode sensor for thin ice detection of aircraft wings[J]. IEEE sensors journal,2022,22(11):11006-11015.

[71] GERALDI J J,HICKMAN G A,KHATKHATE A A,et al. Measuring ice distribution profiles on a surface with attached capacitance electrodes: US 5,551,288[P]. 1996-09-03.

[72] ROY S,DEANNA R G,IZAD A,et al. Miniature ice detection sensor systems for aerospace applications[C]//Proceedings MEMS 98. IEEE. Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. An Investigation of Micro Structures,Sensors,Actuators,Machines and Systems (Cat. No. 98CH36176). Piscataway,NJ,USA: IEEE,1998: 75-80.

[73] SEEGMILLER L H B. Ice detector and deicing fluid effectiveness

monitoring system: US 5,523,959 [P]. 1996-06-04.

[74] FREELY R. Enhancing aircraft flight safety with primary ice detection sensor [J]. Sensors, 1994, 11(6): 28-30.

[75] DEANNA R G, MEHREGANY M, ROY S. Microfabricated ice-detection sensor [C] //Proceedings Volume 3046, Smart Structures and Materials 1997: Smart Electronics and MEMS. Bellingham, WA, USA: SPIE, 1997: 42-51.

[76] 李宗兴,陈德勇,王军波. MEMS 应变式结冰传感器设计与制作 [J]. 传感技术学报,2011,24(8):1108-1113.
LI Zongxing, CHEN Deyong, WANG Junbo. Design and fabrication of MEMS strain gauge icing sensors [J]. Chinese journal of sensors and actuators, 2011, 24(8): 1108-1113(in Chinese).

[77] BOTURA G, FAHRNER A. Icing detection system-conception, development, testing and applicability to UAVs [C] //2nd AIAA "Unmanned Unlimited" Conf. and Workshop & Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2003.

[78] 黄维. 阻抗式路面状态传感器研制及实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学,2019.

[79] WALLACE R W, REICH A D, SWEET D B, et al. Ice thickness detector: US 6,384,611 B1 [P]. 2002-05-07.

[80] 詹湘琳,陈晨,孙李明恒. 基于超声 Lamb 波的不同种类积冰厚度检测 [J]. 激光与光电子学进展,2023,60(1):0116003.
ZHAN Xianglin, CHEN Chen, SUN Limingheng. Detection of different ice thickness types based on ultrasound lamb waves [J]. Laser & optoelectronics progress, 2023, 60(1): 0116003(in Chinese).

[81] LUUKKALA M. Detector for indicating ice formation on the wing of an aircraft: US 5,467,944 [P]. 1995-11-21.

[82] 张雨杏. 基于 SH 波的旋翼结冰冰层厚度检测机理研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学,2018.

[83] MARTIN S J, RICCO A J, NIEMCZYK T M, et al. Characterization of SH acoustic plate mode liquid sensors [J]. Sensors and actuators, 1989, 20(3): 253-268.

[84] 阮鹏,陈智军,张亦居,等. 瑞利型声板波的液体传感研究 [J]. 中国机械工程,2013,24(22):3071-3074.
RUAN Peng, CHEN Zhijun, ZHANG Yiju, et al. Research on liquid sensing of Rayleigh acoustic plate mode wave [J]. China mechanical engineering, 2013, 24(22): 3071-3074(in Chinese).

[85] VELLEKOOP N J, JAKOBY B, BASTEMEIJER J. A Love-wave ice detector [C] //1999 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. International Symposium (Cat. No. 99CH37027). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 453-456.

[86] BOTKIN N D, TUROVA V L. Mathematical models of a biosensor [J]. Applied mathematical modelling, 2004, 28(6): 573-589.

[87] JAKOBY B, VELLEKOOP M J. Properties of Love waves: applications in sensors [J]. Smart materials and structures, 1997, 6(6): 668.

[88] 江城,倪世宏,李红浪,等. Love 波飞机结冰传感器研究 [J]. 航空学报,2009,30(5):906-911.
JIANG Cheng, NI Shihong, LI Honglang, et al. Study of LOVE wave aircraft ice sensor [J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica, 2009, 30(5): 906-911(in Chinese).

[89] KOVACS G, LUBKING G W, VELLEKOOP M J, et al. Love waves for (bio)-chemical sensing in liquids [C] //IEEE 1992 Ultrasonics Symposium Proceedings. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1992: 281-285.

[90] JOSE K A, SUNIL G, VARADAN V K, et al. Wireless IDT ice sensor [C] //2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No. 02CH37278). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 655-658.

[91] WILTSHIRE B, MIRSHAHIDI K, GOLOVIN K, et al. Robust and sensitive frost and ice detection via planar microwave resonator sensor [J]. Sensors and actuators B: Chemical, 2019, 301: 126881.

[92] HALL D K, FOSTER J L, CHANG A T C, et al. Freshwater ice thickness observations using passive microwave sensors [J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 1981, GE-19(4): 189-193.

[93] RIDLEY J. Surface melting on Antarctic Peninsula ice shelves detected by passive microwave sensors [J]. Geophysical research letters, 1993, 20(23): 2639-2642.

[94] TARIQ R U, YE M, ZHAO X L, et al. Microwave sensor for detection of ice accretion on base station antenna radome [J]. IEEE sensors journal, 2021, 21(17): 18733-18741.

[95] 祁相莹. 基于传热原理的结冰条件探测方法及仿真研究 [D]. 武汉: 华中科技大学,2017.

[96] KIDD C T, ADAMS J C. Fast-response heat-flux sensor for measurement commonality in hypersonic wind tunnels [J]. Journal of spacecraft and rockets, 2001, 38(5): 719-729.

[97] 杨庆涛,白菡尘,张涛,等. 快速响应热流/温度传感器设计与特性分析 [J]. 兵工学报,2014,35(6):927-934.
YANG Qingtao, BAI Hanchen, ZHANG Tao, et al. Design and response characteristics analysis of a fast-response sensor for temperature and heat flux measurement [J]. Acta armamentarii, 2014, 35(6): 927-934(in Chinese).

[98] 肖春华,王宏伟,乔宝英,等. 基于光强反射和压电振动的混合式结冰探测系统 [J]. 航空动力学报,2022,37(3):449-456.
XIAO Chunhua, WANG Hongwei, QIAO Baoying, et al. Hybrid ice detection system based on light intensity reflection and piezoelectric vibration [J]. Journal of aerospace power, 2022, 37(3): 449-456(in Chinese).

（编辑　黄崇亚　张璐）